



TITLE:

## 5.Phonon Magnonについて(II講義 ノート,基研研究会報告)

AUTHOR(S):

浜口, 由和

---

CITATION:

浜口, 由和. 5.Phonon Magnonについて(II講義ノート,基研研究会報告).  
物性研究 1967, 8(4): D33-D53

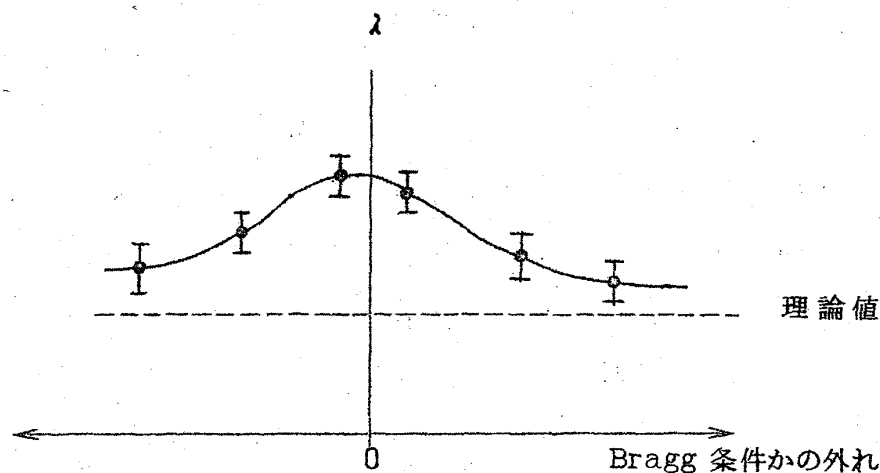
ISSUE DATE:

1967-07-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/86062>

RIGHT:



- 加速電圧への依存性は傾向的によく一致する。

## 5 Phonon Magnon について

原 研 浜 口 由 和

### 1. Introduction

Neutron の inelastic scattering, quasi-elastic scattering を利用しての研究の対象は大別すると次の 4 つとなる。

- 固体の dynamics—格子振動 (拡散)
- 液体 (気体) の dynamis—分子内運動, 拡散 collective motion
- 磁性体の spin collective motion—spin wave
- " dispersive motion—spin diffusion etc.

thermal neutron の energy, transmission 等から考えて上記の性質の研究が可能であることは旧くから指摘されて居り van Hone の理論を始めとして多くの理論的研究は行われてきたのであるが, 実験の方は 1953 年 Brockhouse が格子振動の観測に成功, Lowde, Liste が白色中性子を用いて spin wave の観測に成功しておりながら中性子源の弱さの為に, 測定を可

能にする様な大型単結晶の入手難分解能の悪さ等の困難さを生じ、又測定の為長時間の machine time を必要とすることもあって、その後 12 - 13 年は飛躍的な進展がなかった。しかし最近にいたり  $10^{14}$  級の原子炉が各地に建設、稼働を始め、それによる実験データが発表されだしたことや、HFBR HFIR の様な  $10^{15}$  級の原子炉が米、英、独、ソ等で建設、稼働を開始又は計画されるという気運になって来て、中性子回折の実験の主流が非弾性散乱になって来る日もそう遠くはないと思われる。我が国に於ても  $10^{14}$  級である JRR-2 の運転が軌道に乗り分光器の建設も完了して、やっと 1, 2 の測定結果が得られた様な状態になった。しかし後に示す様に夫々の研究はやっと一応のデータが得られたという程度であり、 $10^{15}$  級の中性子源の建設を急がないと又々 10 年の遅れを取もどすことは不可能となってしまふであろう。

## 2. 固体、液体の collective motion

現在迄に一番多くの測定データが得られているのは固体の格子振動の分野である。これは Brockhouse, Woods を中心とする Chalk River の group の精力的な研究、及びここで勉強した人達が各国にもどって同様な方法で測定を行い出した為である。この分野で最も良く用いられている方法は三軸型分光器を用いての Q-const 法であり、これは反射強度の profile をきっちり決める必要はなく、peak の位置を決めれば良いので、分解能の影響を受けることが比較的少く、なかなかきれいな測定結果が得られている。

### 2.1 元素特に金属

第 1 表に現在迄に格子振動の分散関係が測定された元素を周期律表の上で示す。一見してわかることは先づ実験し易い（常温で安定な大型単結晶の出来るもの中性子吸収断面積の小さいもの）元素から始められたということである。従って個々のものを夫々見て行くことはあまり意味がないので、この中から一二興味のある点について述べる。これは主として金属の格子振動の問題に関係したものである。金属の格子振動に関しては戸谷氏の総合報告が二三発表されているので詳しいことはそれを見ていただくこととする。この理論的取扱いも戸谷氏によって始められたもので、electron phonon interaction により dispersion relation に見られる anomaly (所謂 Kohn anomaly) を説

明しようとするものであるが、それによると Fermi surface の形が問題となってくる。その例として議論されるのが V 及び VI 族金属の格子振動である。V 族の元素 Nb, Ta, VI 族の元素 Cr, Mo, W の夫々について格子振動の測定があるが、それを見るといづれも Cu, Na 等にくらべて複雑な様相を示している。しかし V 族及び VI 族の夫々の間では energy の scale をかえるだけでよく似た curve を示す。band structure の計算結果から、V 及び VI 族は夫々似た Fermi surface を持っていることが知られているが、夫々の anomaly を示す点は band 間の transition の  $k$  を考えると Kohn anomaly として対応づけることが出来る。又両族とも b.c.c. structure を持ち性質が似ているので固溶体を作ることが出来るので、Nb-Mo alloy について Nb から Mo に変る間に dispersion relation がどう変化するかをしらべる実験が Chalk River で行われたが、比較的順調な変化があることがわかり dispersion relation が band structure と関係していること及びこの合金間では rigid band model が成立することが確められた。一方 Pb の dispersion relation にあらわれる anomaly は Kohn anomaly であることは Brockhouse が指摘して以来有名な事実であるが、前の rigid band の考えを用いて Pb に Tl, Bi 等を合金させ、electron の数を変化させ、即ち Fermi surface の相対位置を変化させた時 Kohn anomaly の位置がどう変るかをしらべることは、戸谷氏も指摘して居られる様に興味のあることである。この経験は我々も計画して準備を行っていたが、ごく最近 Brockhouse により一連の実験結果が報告された。

これによると Pb に Tl を入れた場合 Kohn anomaly の  $q$  は Tl の濃度が増加すると共に大きい方に移動している。(curve の形はそんなに大きくは変わらないが次第に Cu に近い素直な形になっていく)

我々の所ではやはり同様な試みを Cu-Ni 合金について行った。Cu 及び Ni はいずれも f.c.c. structure を持ち全率固溶体を作る。格子振動の dispersion relation もよく似て居り、Cu のそれを energy について約 1.3 倍すると Ni のものになる。ただ異っていると考えられるのは Ni の 3d band の effect である。magnetic properties からはこの合金では rigid band model が成立し Ni の 0.6 の 3d band の hole は Cu の 4s electron でうめられ

## Phonon, Magnon について

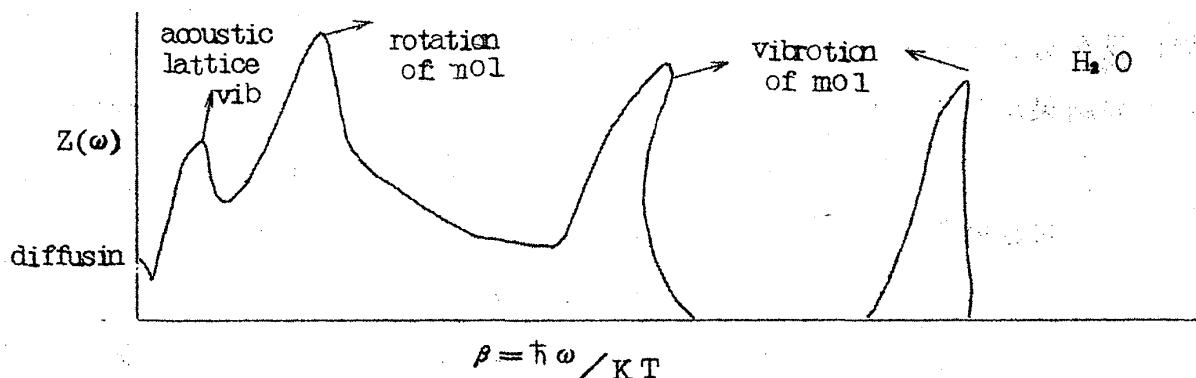
Ni 40% Cu alloy から強磁性が出現しなくなると言われている。我々の求めた Cu 及び Cu-10% Ni 合金の dispersion relation を図に示す。一見にてわかることはわずか 10% Ni を入れただけで dispersion relation が非常に複雑なものに変化していることである。Kohn anomaly が現われる条件についてはまだ完全な検討を終わっていないが, Cu で出現しないのが 10% Ni を入れただけで大きくあらわれることは簡単には説明が出来そうにもない。試みにこれらの dispersion curve を Fourier 分解し面間の interaction force を求めてみると表の様になり Nb-Mo の場合には第 2, 第 3 の近い layer 間の force が大きく変化していたのに対し, 第 3 迄はあまり変わらず第 4 以上が少しずつ変って Ni 合金の dispersion curve を形成していることがわかる。

## 2.2 液 体

主として simple liquid の dynamics について述べる。時間の関係で詳しくは "Contemporary Physics" にある Egelstaff & Schofield の report を参照されたい。同上 6 (1965) 274~284, 453~464

- i) incoherent scattering よりきまる  $S_s(Q, \omega)$  を外挿した spectral density  $z(\omega)$  と velocity correlation function との関係

$$\frac{Z(\omega)}{\omega^2} = 2 \left\{ \frac{S_s(Q, \omega)}{Q^2} \right\}_{Q \rightarrow 0} = \frac{1}{3\pi\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega\tau) \langle v(0), v(\tau) \rangle d\tau$$



jump diffusion → simple diffusion に移行する時間。c は大体  $1 \sim 2 \times 10^{-12}$  sec これはある diffusion process・general feature を示すものと思われる。

- ii) coherent inelastic scattering

Brillouin scattering に対応するものが neutron で見られ, これから liquid の acoustic lattice vibration の dispersion relation が得られる。Pb, Al 等の例が最近報告されている。測定方法は未だ  $S(Q, \omega)$  を求める方法。spin wave に於ける diffraction method に相当するもの等であるが, 今後もっと詳しくしらべられるであろう。

### 3. 磁性体の collective motion

固体の格子振動にくらべてスピン波の測定されている物質の数は非常に少い。

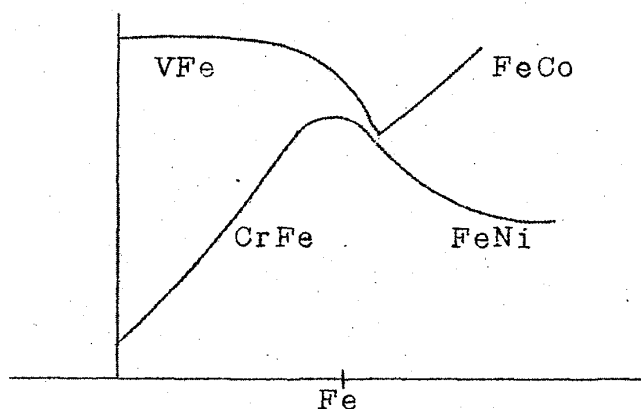
$$\hbar\omega = Dq^2 (1 - \beta q^2 + \gamma q^4 \dots\dots\dots)$$

$\beta, \gamma$  が有限の値をとるものもある。

表に示す様に金属強磁性体, 即ち Ni, Co, Fe ではスピン波エネルギー (これは大体 zone boundary で  $\hbar\omega_c$  になる) が非常に大きく, Fe では zone boundary で 100 meV 位であろう。従って  $\frac{2\pi}{a}q$  で 0.2 位迄しか測定されていない。

もし zone boundary 迄測定されれば  $\tau$  がどの位の range に亘っているかわかる筈。

$q = 0.2$  位でも  $\beta, \gamma$  の term があらわれている D の electron number による変化のみであれば  $\hbar\omega = Dq^2$  を仮定し small angle scattering で求められる。



Kohn anomaly でないかといわれているもの。Co-9% Fe alloy 詳しくはかるとどうもあるらしい。これに対する説明としては,

- ① elastic-magnon
- ② Kohn anomaly  $|q - \tau| = 2k_F$   
 $|q - \tau| = (k_F^+ - k_F^-)$

Phonon, Magnon について

antiferromagnetic

一般に  $T_N$  の低いものが多いので zone boundary 迄観測される。  $J_1, J_2$  がわかってる。

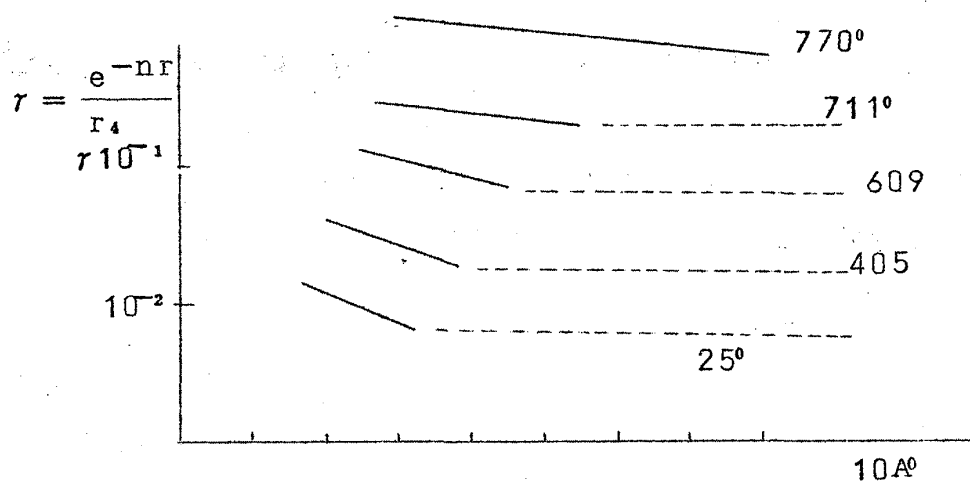
#### 4. Critical scattering

最近  $\text{KMnF}_3$ ,  $\beta\text{-CuZn}$  できちんと resolution function を correct した実験データの analysis が行われた。

$$\kappa_1^2 \propto (T - T_C)^{4/3} \quad \text{--- KMnF}_3$$

$$\chi = \frac{1}{(T - T_C)^{1/25}} \quad \text{--- } \beta\text{-brass}$$

O-Z の式との関係がしらべられ,  $\text{KMnF}_3$ ,  $\beta\text{-brass}$  ではよく合っていると云われる。 Fe ではあまり合わない。これは Averback, Parcell 共



first neighbour correlation coef

T (°C)	$a_{nn}$	$a_{nn}/n$
25	0.01	0.25
467	0.02	0.15
609	0.04	0.13
711	0.08	0.15
770	0.21	0.21

金属  $C_r$  の場合

$$\frac{1}{\kappa_1^2} \propto (T-T_0)^{0.5 \sim 0.6}$$

$$\frac{1}{\kappa_1} \approx \begin{matrix} 300\text{\AA} & q_{\parallel} \\ 500\text{\AA} & q_{\perp} \end{matrix}$$

 0, z にあまり良く合わない。特に  $q_{\parallel}$  の場合

$$\frac{\partial M(r, t)}{\partial t} = A \Delta M$$

$$\frac{1}{\tau_q} = A q^2$$

$$\frac{d^2 \sigma}{d\omega d\epsilon} \sim \frac{1}{\frac{V}{\pi} + A q^2 + B q^4} \times \frac{A q^2}{\omega^2 + A^2 q^2}$$

次頁のは中性子散乱の references です。

## Ferromagnetic &amp; Ferrimagnetic Substances

Substance	$r_1$ (Å)	$\kappa_1$ (Å <sup>-1</sup> )	$\Lambda_1$ (cm <sup>2</sup> /sec)	Method	Reference
Fe	1.05	-16°C	$2.88 \times 10^{-2}$	0.9 Å neutron の Small angle Scattering の Fourier 変換	Gersh Shull Wijk-inson P.R.103(56) 525
	1.05	+20°C	$1.47 \times$		
	0.91	+66°C	$2.32 \times$		
	0.74	+84°C	$3.12 \times$		
	1.4	$\kappa_1 = 2.5 \times 10^{-2} \sqrt{T-T_0}$		白色中性子の単結晶による散乱強度の角度変化	Lowde R.M.P.30 (58) 69
	$r_1(T_0)$	+10°C	$4 \times 10^{-2}$	$\Lambda_1(T_0) = 0$	3 ~ 6 Å 中性 Ericson &



Substance	$r_1$ (Å)	$\kappa$ (Å <sup>-1</sup> )	$\Lambda$ (cm <sup>2</sup> /sec)	Method	Reference								
	$\approx 1.46 \pm 0.17$ の温度変化は+5°Cで約10%	<table><tr><td>20°</td><td>6.0×</td></tr><tr><td>30°</td><td>8.0×</td></tr><tr><td>40°</td><td>9.0×</td></tr><tr><td>50°</td><td>11.0×</td></tr></table>	20°	6.0×	30°	8.0×	40°	9.0×	50°	11.0×	$\Lambda_1(T) = 1.51 \times 10^{-5} (T - T_c)$	子の3°における反射強度変化及びエネルギー変化	Jacrot JPoS 13 ( '60 ) 235
20°	6.0×												
30°	8.0×												
40°	9.0×												
50°	11.0×												
		$\kappa_1^2 = 0.9 \times 10^{-4} (T - T_c)^{\frac{4}{3}}$ $\kappa_1 \approx 1.6 \times 10^{-2} \sqrt{T - T_c}$											
同上		$\kappa_1(T_c) < 5 \times 10^{-5}$ $q^4$ term はそう大きくない。 $\kappa_1^2 = 0.9 \times 10^{-4} (T - T_c)^{\frac{4}{3}}$	$\Lambda_1(T_c) = 2.20 \times 10^{-3}$ (後の計算→ $3.9 \times 10^{-3}$ ) upto +30°迄 const	4.79Å 中性子の小角散乱強度の角度変化及びエネルギー分布 (ローター)	Jacrot et al ISN in SL IAEA '63 Vol. 317								
(126)		Static app. では上と大体同様であるが $\Lambda_1$ を入れるとやや大きくなる。 $\kappa_1^2 \propto (T - T_c)^{\frac{4}{3}}$ $\frac{(q)^4}{(q)^2} = 29 \text{ Å}^2 (T - T_c = 0 \sim 10^\circ)$	$\Lambda_1 = 3.88 \times 10^{-3}$ (Tに independent)	4.28Å 中性子の小角散乱強度の角度分布及びエネルギー分 (マイカ, Z <sub>n</sub> 単結晶)	Passell et al PR. 139 ( '65 ) A 1866								
N 1		$\kappa_1^2 = 0.46 \times 10^{-4} (T - T_c)^{\frac{4}{3}}$	$T_c = 31.6 \times 10^{-3} + 11^\circ\text{C}$ 5.68×	4.75Å 中性子の小角散乱強度の角度分布	Cribier, Jacrot Parette								

Substance	$r_1(\text{\AA})$	$\kappa_1 (\text{\AA}^{-1})$	$\Lambda_1 (\text{cm}^2/\text{sec})$	Method	Reference
		$\frac{(q^4)}{(q^2)} = 200 \text{\AA}^2 (110 \text{\AA}^2)$	28 $9.46 \times 10^{-3}$ 53.5 $17.3 \times 10^{-3}$	布及びエネルギー - 分布 (ローター)	J. P. S. Japan 17 ('62) 67
$\text{FeO}_4$	$4 \pm 0.1$	$\kappa_1 = 4.9 \times 10^{-2} \sqrt{T - T_C}$	$7.5 \times 10^{-3}$ ( $T$ independent)	白色中性子・単 結晶法	Riste JPCS17 ('61) 308
Fe		$770 \quad \frac{1}{\infty} \quad 10.6$ $778 \quad \quad \quad 9.0$ $782 \quad \quad \quad 8.4$ $812 \quad \quad \quad 6.0$ $\frac{1}{\kappa_1^2} \propto (T - T_C)^{1.27}$		$1.38 \text{\AA}$ の中性子 による単結晶の 広角度空間分布 O.Z 分布との 比較 $T_C$ 以下も行う	Spooner <sup>∞</sup> Averback P.R.142 ('66) 291

Substance	$\gamma_1$ (Å)	$\kappa_1$ (Å <sup>-1</sup> )	inelasticity	Method	Reference
CoO	[存在を示したのみ]			1 Å 中性子の格子点附近の散乱強度の Fourier 変換 (単結晶 1.7)	McReynolds Riste J, Phys. et Rod 20 (59) 175
α-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.68 Å ×	$\kappa_1 = 3.2 \times 10^{-4} (T - T_N)^{\frac{4}{3}}$ (up to $T - T_N = 70$ )		1.5 Å 中性子の格子点附近の散乱強度の空間分布	Riste, Wanic JPCS 17 (61) 318
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		$\kappa_1 \cong 2.3 \times 10^{-4} (T - T_N)^{\frac{4}{3}}$ 余りよく合はない		白色光の単結晶による散乱の角度分布	Krasnich et al ISN in SL (IAEA, 1963) Vol. 2 327
MnF <sub>2</sub>			$6 \times 10^{-4}$ (常温) $\Lambda = 0.36 a^2$ $S(S+1)^{2+}$ $\hbar \rightarrow 6.9$ $\times 10^{-4}$	4.27 Å 中性子の 7.5° に於けるエネルギー巾 (ローター)	Cribier, Jaerot ISN in SL (IAEA, 1967) Vol. 2 309
MnF <sub>2</sub>		$\kappa(001)(T_N) \neq 0$ $\kappa(100)(T_N) = 0$ $\kappa_2 \propto (T - T_N)^{1.3 \pm 0.3}$ $\kappa_{11} \propto (T - T_N)^{1.2 \pm 0.2}$	$T_N$ でのひろがり $5^\circ \kappa(8 \times 11 \frac{-1}{\text{sec}})$	3 Å 中性子の空及びエネルギー分布 (ローター)	Turberfield OkaZaki, Stevenson Proc. Phys. Soc 85 (65) 743

Substance	$\gamma_1$ (Å)	$\kappa_1$ (Å <sup>-1</sup> )	inelasticity	Method	Reference
FeS		$\kappa_1 \approx 1 \times 10^{-2}$ (at +20°)	$\Lambda_1 = (40 \pm 10) \times 10^{-3}$ (at +20°)	1.376 Å 中性子の単結晶による散乱のエネルギー分布 (結晶, 2 <sub>n</sub> )	Wanic et al J, Phys. 25 ('64)
C <sub>r</sub>		$\frac{1}{\kappa_1^2} \approx (T - T_N)^{-1.4 \pm 0.1}$ $\kappa_1 = 0.010 \text{ Å}^{-1}$ (39.4°)		0.855 Å 中性子の単結晶による散乱の空間分布	Møller, et al Solid State Comm 2 ('64) 109 Proc Nottingham- ham Conf 101
KMnF <sub>3</sub>		$\kappa_1^2 \propto (T - T_C)^{4/3}$		1.05 Å 中性子の単結晶による散乱の空間分布	Cooper & Nathans J.A.P. 37 ('66) 1041
MnF <sub>2</sub>		$\frac{1}{\kappa_1} = 17 \text{ Å}$ at +0.92°		4.27 Å の中性子の単結晶による散乱空間分布のエネルギー分布	Antonini J.P.C.S 28 ('67) 11



Substance	Method	Range	Data	Reference
Tb (90°K)	Energy Analy. (3-axis)	a, b, c, 方向 h $\omega$ : 2~14 meV ac e op br- anch	J <sub>1</sub> ~ J <sub>5</sub> J <sub>1</sub> ' ~ J <sub>5</sub> ' anomaly in Q -direction	Møller e Hou- man P.R.L <u>16</u> ('66) 737
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Energy Analy. (3-axis)	[0.01] 方向 ac e op branch h $\omega$ : 2~80 meV	J <sub>AB</sub> =2.0 meV	Brockhouse P.R. <u>106</u> ('57) 859 Brockhouse. Wa- tanabe Phyo. Jetter e <u>1</u> ( '62) 189
	Diffraction (polarized)	q: 0.05~0.32 h $\omega$ : 1~20 meV	h $\omega$ = (h <sup>2</sup> / 2m) ( $\alpha$ q <sup>2</sup> + $\beta$ q <sup>4</sup> ) $\alpha$ = 297 $\pm$ 15 $\beta$ = (-2.2 $\pm$ 0.4) J <sub>AB</sub> = 2.35 meV	Alperin et al P.R. <u>154</u> ('67) 508
YIG	Diffraction の変形 (Polarized)		D = 250 meV 260 $\pm$ 0.02 meV	Ferguson. Saenz Poagor J.A.P <u>37</u> ('66) 1050

Substance	Method	Range	Data	Reference
Fe Fe-Si alloy	Diffraction (Polarized)	$q: 0.05 \sim 0.2$ $\hbar\omega: 3 \sim 30 \text{ meV}$	$\hbar\omega = Dq^2 (1 - \beta q^2 + \gamma q^4)$ $D = 266 \text{ meV}$ $\beta = 3.2 \text{ \AA}^2$ $\gamma = 8.4 \text{ \AA}^4$	Shirane, Nathans et al P.R.L. <u>15</u> ('65) 146
Co (f.c.c) Co-Fe alloy	Energy analy (3-axis)	$q: 0.03 \sim 0.2$ $\hbar\omega: 2 \sim 50 \text{ meV}$	$\hbar\omega = C + 12JS \times (1 - \cos(\frac{2\pi}{\sqrt{d}} \frac{qa}{2\pi}))$ $JS = (1.47 \pm 0.15) \times 10^{-2} \text{ eV}$ $C = (1.3 \pm 0.5) \text{ meV}$	Sinclair & Brockhouse P.R. <u>120</u> ('60) 1638
	Diffraction Non-Polarized non-magnetized		$E(q) = \frac{\hbar^2}{2m_0} (\alpha q^2 + \beta)$ $\alpha = 84 \pm 8$ $JS = \frac{\alpha \hbar^2}{4a^2 m} = 6.94 \pm 0.7 \text{ meV}$ $E(q) = \frac{\hbar^2 q^2}{2m_0} = 2.9 \pm 0.6 \text{ meV}$ Kohn anomaly	Frikkee & Piste Proc Nottingham Conf. 299
	Diffraction (Polarized)		Kohn anomaly を否定	Riste, Shirane et al J.A.P. <u>36</u> ('65) 1076
	Diffraction (Polarized)		$\hbar\omega = E(q) - 2JSa^2 q^2$ $JS = 7.0 \pm 0.6 \text{ meV}$ $E(q) = 1.9 \pm 0.5 \text{ meV}$ $\vec{l}q + \vec{\tau}_{hke} = 2\vec{k}_F$	Furrer, Schneider, Halg Solid State Comm <u>3</u> ('65) 339

			$\sqrt{\epsilon}$ anomaly あり $1/\vec{k}_F = 1.44 \pm 0.02 \text{ \AA}^{-1}$	
	Diffraction (magnetized)	$q: 0.05 \sim 0.1$ $\hbar\omega: 3 \sim 10 \text{ meV}$	$\hbar\omega = E(q) + Dq^2$ $D = 27.5 \pm 1.6 \text{ meV}$ $E(q) = 0.52 + 0.16 q^2 \text{ meV}$ anomaly 有り elasto-magn- on or $1q + 2\pi r$ $1 = 1/\vec{k}_F - k_F$	Frikkee Physica <u>32</u> ('66) 2149
Co (h.c.p)	Diffraction (polarized)	$q: 0.04 \sim 0.2$ $\hbar\omega: 2 \sim 33 \text{ meV}$	$\hbar\omega = Dq^2 (1 - \beta q^2 + r q^4 \dots)$ $D = 490 \pm 20 \text{ meV}$ $\beta = 3.3 \pm 0.4 \text{ \AA}^2$	Alperin et al J.A.P. <u>37</u> ('66) 1052
Ni	同上	$q: 0.05 \sim 0.11$ $\hbar\omega: 3 \sim 13 \text{ meV}$	$D = 340 \pm 45 \text{ meV}$	Riste, Shirane et al J.A.P. <u>36</u> ('65) 1076



1. R.E.Schmunk. R.M.Brugger, P.D.Randolph. K.A.Strong.  
P.R. 128 (1962) 562.
2. R.E.Schmunk.  
P.R. 149 (1966) 450
3. E.W.J.Mitchell, J.R.Itardy. D.H.Saunderson  
ISNSL II (1963) 49
4. J.L.Warrer, R.S.Weutzel, J.L.Yarnell  
ISN vol I (1965) 361
5. G.Dolling, B.u.Brockhouse  
P.R. 128 (1962) 1120
6. P.A.Egelstaff, D.H.C.Harris. Physics Letters 7 (1963) 220
7. B.C.Haywood, I.M.Thorpe. I.S.U.S.L vol II (1963) 111
8. A.D.B.Woods, B.N.Brockhouse. R.H.March  
H.T.Stewart. R.Bouers. P.R. 128 (1962) 1112
9. S.T.Cocking  
I.S.N.S.L (1963) vol I 227
10. M.F.Collina. Proc.Phys Soc. 80 (1962) 362
11. P.K.Iyengar. G.Venkataraman.  
P.R.Vijayaraghavan A.P.Roy. I.S.N vol (1965) 153
12. R.S.Cartu, H.Palevsky, D.J.Hughes  
P.R.106 (1957) 1168
13. B.N.Brockhouse. A.T. Stewart. Rev.Mod.Phys.30 (1958) 236
14. K.E. Arrison, S.Holmryd. U.Dohlberg  
I.S.N.L (1961) 587
15. R.E.Schmunk, R.M.Brugger, P.D.Randolph  
I.S.N.S.L vol I (1965) 379
16. J.L.Gainell, J.L.Warren. S.H.Koenig  
"Lattice Dynamics" (1965) 57
17. R.Stedman. G.nelson  
P.R. 145 (1966) 492

18. B.N.Brochhouse  
J.Phys.Uhew.Svlids 8 (1959) 400
19. G.Dolling  
I.S.N.S.L (1961) 563
20. N.Krvo. G.Borgonovi. K.Skold, K.R.Larsson  
I.S.N.vol II (1965) 101
21. B.A.Dasaunacharya. K.R.Rao  
P.R.137 (1965) 417
22. B.Mozer. K.Otnea. H.Palivsky  
"Latt, c Iynams' cs" (1965) 63
23. A.T.Stewart, B.N.Brockhouse.  
Rev.Mod.Phys. 30 (1958) 250
24. C.M.Eisenhaber.I.Pelah, O.J.Hughes.  
H.Palevsky. P.R.109 (1958) 1046
25. K.C.Turbufield. P.A.Egelstaff  
P.R.127 (1962) 1017
26. M.G.Zemlyanow,Y.M.Kagan. N.A.Thervoplebov  
A.G.Tchetserin  
I.S.N.S.L (1963) vol II,125
27. R.Hass.W.Kley. K.H.Krebs. R.Rubin.  
I.S.N.S.L vol II (1963) 145
28. W.Glaser, F.Carvollo, G.Ehret.  
I.S.N. (1965) vol I,99
29. H.B.Meller, A.R.Mockintosh.  
I.S.N.vol I (1965) 95
30. P.K.Iyeugan. N.S.Satya,Murthy.  
B.A.Dasannacharya  
I.S.N.S.L. (1961) 555
31. G.E.Low  
Proc.Phys.Soc.79 (1962) 479

32. J.Bergsma, C.Van.Dijk, D.Tocchatti  
Phys.Letters. 24A (1967) 270
33. N.A.Tchernoplekov, M.G.Zemlyanoy  
M.G.Tchetserin, B.G.Lyashtcheukc  
I.S.N.S.L. vol II (1963) 159
34. R.J.Birgeneau, J.Corder, G.Jolling. S.D.B.Woock  
P.R. 136 (1964) A1359
35. D.Cribier, B.Jacrot, D.Saint-James  
I.S.N.S.L. (1961) 549
36. E.Z.Vintaikin U.V.Gorbachev, P.L. Gruzin  
Soviet Plupies 7 (1965) 296
37. S.K. Sinha  
P.R.143 (1966) 143
38. G.Borgsnovi, G.Caglioti, J.J.Antal  
P.R.132 (1963) 683
39. E.Maliszewski, J.H.Rasulawski  
D.Sledziewska  
"Lattice Dynamics" (1965) 33
40. B.N.Brock house, P.K.Iyeugar  
P.R.111 (1958) 747
41. A.Ghose, H.Palevsky, D.J.Hughes, I.Pelah  
C.M.Eiseuhauer  
P.R.112 (1959) 49
42. B.N.Brsckhause, B.A.Dasannachager  
Solid.State.Comm. (C1963) 205
43. G.E.Coote, B.C.Haywood  
I.S.N.S.L (1963) vol I, 249
44. M.Antonini, P.Ascarelli, G.Caglioti  
P.R 136 (1964) A1280

45. Y.Nakagawa, A.D.B. Woods  
Phys. Rev.Lettur 11 (1963) 271
46. A.D.B Wovek. S.H.Cheu  
Solid,State Consm 2 (1964) 233
47. B.Mozer, K.otones  
I.S.N.S.L vol II (1963) 167
48. H.Palevakg  
I.S.N.S.L (1961) 265
49. S.J.Cocking, Z.Guner  
I.S.N.S.L vol I (1963) 237
50. R.E.Schmunk, W.R.Gavin  
P.R.Letters 14 (1965) 44
51. J.M.Rowe, B.N.Arochhouse, E.C.Sveusson  
P.R.Letters 14 (1965) 554
52. D.Long Price  
I.S.N. vol I (1965) 109
53. A.D.B.Wooels  
P.R.136 (1964) A781
54. S.H.Chen, lB.N.Brockhouse  
Solid.State Comn. 2 (1964) 73
55. B.N.Brockhouce. N.K.Pppe  
P.R.Letters 3 (1959) 259
56. B.N.Brockhouse, T.Arass,G.Caglioti  
K.R.Rao A.D.B.Woods  
P.R. 128 (1962) 1029
57. K.C.Turberfield  
Prsc. Phys. Soc. 80 (1962) 395
58. H.Palevsky  
I.S.N (1965) p265

59. S.J.Cocking, P.A.Egelstaff  
Phys. Letters 16 (1965) 130
60. P.D.Raudolph  
WASH-1068 P175
- 61 J.L.Yarnell, J.L.Warrer, R.G.Wenzel.S.H.Kwenig  
I.B.M.J.Res.Develop, vol 8 234 (1964)
62. N.B.Chernoplekov. M.G.Zernly a now  
E.G.Brownian.AG.Chicherin  
I.S.N.S.L. vol II (1963) 173
63. H.Bjarrun Maller, A.R.Machin 50shP  
P.R.Letters 15 (1965) 623
64. A.Dollig. G.Gilat  
Solid.state Comm.2 (1964) 79
- 65 G.Gilat, G.Doling  
P.R. (38 (1965) A105)
66. G.Dolling, G.Gilat  
I.S.N (1965) vol I, 343
67. E.C.Svensson, B.N.Brock house  
J.M.Rowe  
Solid State. (Comm.3 (1965) 245
68. A.D.B.Woods B.M.Powell  
Phys. Rev.Letter 15 (1965) 778
69. W.B.Daniels. G.shirane, B.C.Frazer  
H.Umebayashi, J.A.LeaKe  
P.R tellus 18 (1967) 548
70. S.C.Ng (B.N.Brockhouse  
Solid. State Comm.5 (1967) 79

